

УДК 629.78.048.7-716

И.П. КВАС, К.С. ЕПИФАНОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ В ИСПАРИТЕЛЕ ДВУХФАЗНОГО КОНТУРА ТЕПЛОПЕРЕНОСА СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Определенные в результате экспериментов гидравлические сопротивления испарителей системы терморегулирования существенно отличаются от определенных по классическим зависимостям. Было решено модифицировать зависимости, включив в них новый параметр, отражающий зависимость теплофизических параметров среды от температуры. Однако корреляционный анализ показал слабую связь между коэффициентом гидравлического сопротивления и числом Прандля. В результате решение было найдено в виде зависимости от числа Рейнольдса. Хотя полученная в результате зависимость удовлетворительно описывает полученные данные, фактор, вызвавший отклонение зависимости от классических аппроксимаций, так и не был выявлен.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, испаритель, система терморегулирования, космический аппарат.

Введение

Научно-технический прогресс стимулирует значительное повышение требований к создаваемым энергетическим установкам космических аппаратов (ЭУ КА). В связи с развитием науки и возрастающей конкуренцией космические аппараты (КА) стремительно увеличивают свои функциональные возможности, что приводит соответствующему росту

их мощностей. Система энергоснабжения является одной из основных составляющих КА. Из рисунка 1 видно, что система энергоснабжения включает в свой состав подсистему отвода теплоты или, как еще называют, систему терморегулирования (СТР) [1]. Система терморегулирования космического аппарата (СТР КА) является одной из основных его подсистем, от работы которой зависит его нормальное функционирование.

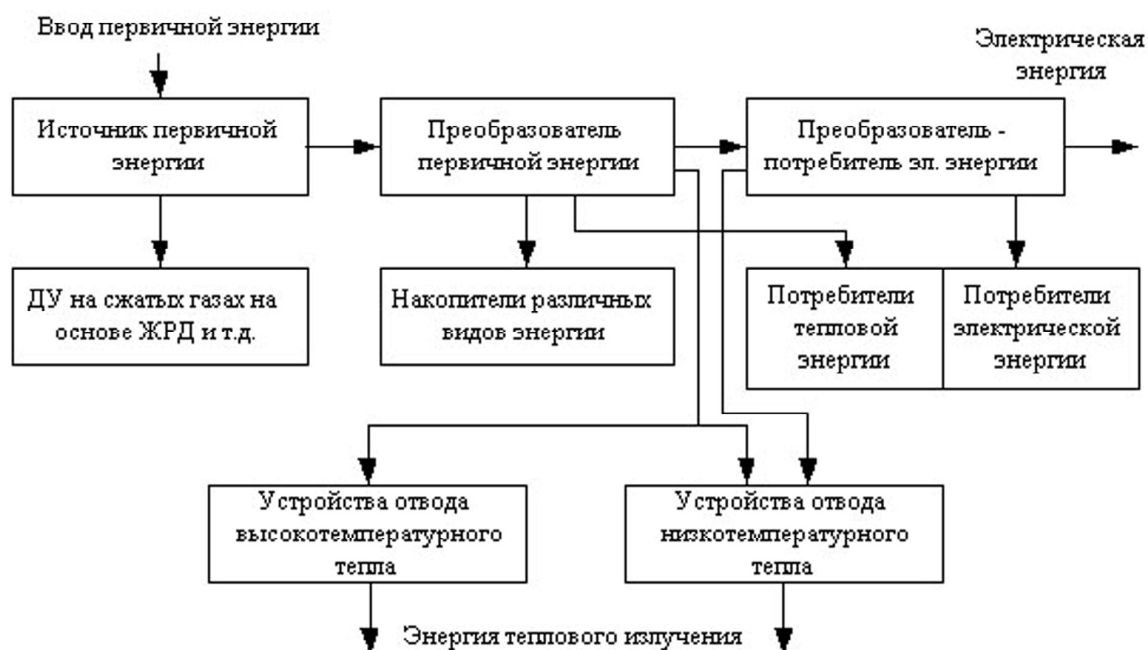


Рис. 1. Структура системы энергоснабжения космического аппарата

СТР условно можно разбить на три основных подсистемы. Первая – различные теплообменники (контактные теплообменники-термоплаты для отвода тепла от электропотребляющего оборудования; газожидкостные теплообменники, обеспечивающие тепловой режим в газонаполненных объемах; корпусные теплообменники, термостабилизирующие элементы конструкции). Вторая подсистема – радиаторы-излучатели, сбрасывающие тепло в окружающее пространство. Третья подсистема – контур циркуляции теплоносителя, объединяет первую и вторую подсистемы, обеспечивает их нормальное функционирование, выполняет регулирующие и управляющие функции. К настоящему времени наиболее распространены замкнутые однофазные контуры теплопереноса с механической прокачкой теплоносителя. Они длительно эксплуатируются и доказали свою надежность. Однако с темпами освоения космоса схемы однофазного контура теплопереноса систем терморегулирования морально устарели. Их мощность отвода тепловой энергии в пределах допустимой массы уже мала для современных многофункциональных искусственных спутников Земли. Главными параметрами космических аппаратов при выводе их на орбиту является масса и мощность. Рост энерговооруженности и линейных размеров КА ведет к увеличению доли массы СТР в суммарной массе объекта. На существующих аппаратах масса СТР составляет до 10% от массы выводимого груза.

СТР на основе двухфазных контуров теплопереноса (ДФК), использующие кипящий теплоноситель, наиболее успешно совмещают важнейшие характеристики. Использование СТР данного типа позволяет уменьшить массу системы примерно в 2 раза, а ее энергопотребление – на порядок ниже, чем у аналогичной системы с однофазным контуром теплопереноса. В то же время при проектировании ДФК СТР КА возникает ряд вопросов, решение которых требует экспериментальных и расчетно-теоретических исследований. Испаритель двухфазного контура теплопереноса представляет собой оребренный внутри канал. Особенностью проектирования ДФК СТР КА является исследование процессов терморегулирования двухфазного теплоносителя в условиях отсутствия гравитационных сил, т.е. вопросы оценки интенсивности теплопередачи и потерь давления на трение в основных элементах системы. Для оценки потерь давления на трение в испарителях СТР была создана экспериментальная установка.

1. Постановка задачи

Изучение потерь давления на трение в оребренном внутри испарителе двухфазного кон-

тура теплопереноса систем терморегулирования космических аппаратов. Определение факторов, влияющих на потери давления. Выяснить, зависит ли перепад давлений от температуры рабочей среды.

2. Экспериментальная установка

Для изучения потерь давления на трение в испарителе с внутренним оребрением был создан экспериментальный стенд, который представляет собой замкнутую систему со свободной струей (см.рис.2). Основным элементом стенда является профиль с продольным оребрением внутренней поверхности. Поперечное сечение профиля приведено на рис.3.

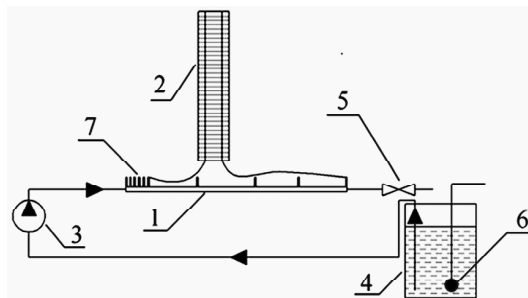


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

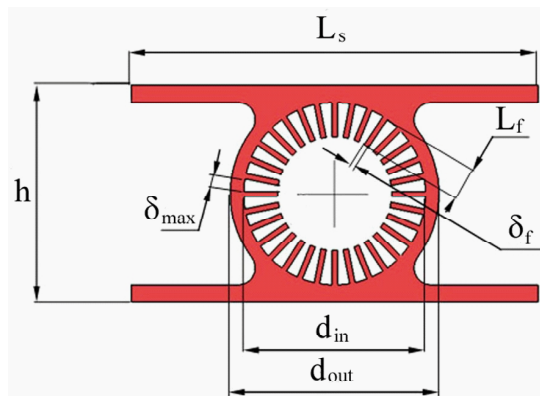


Рис. 3. Поперечное сечение профиля испарителя

Насосом (3) из бака (4) в оребренный профиль (1) под давлением 0,1 МПа подается теплоноситель. В ряде сечений в его боковой стенке имеются штуцера (7) для отбора давления. Трубчатый U-образным манометром (2) последовательно измеряются потери давления на трение в канале на длинах $L = 0,6$ м; 1 м и 2,35 м. Термометр сопротивления (6) измеряет температуру теплоносителя на входе в профиль. Расход теплоносителя через стенд регулируется краном (5). Массовый расход измеряется посредством вспомогательной емкости, секундомера и весов.

Геометрические параметры профиля:

- общая длина профиля $L = 3$ м;

- внутренний диаметр профиля $d_{in} = 13,3$ мм;
- высота ребра $L_{fin} = 2$ мм;
- толщина ребра $\delta_{fin} = 0,4$ мм;
- количество ребер по контуру $N_{fin} = 32$ шт.

Рабочая среда стенда – вода (жидкая однофазная среда). Температура воды на входе в профиль изменялась в диапазоне от 29,7 до 55,1 °С.

Измерительная система состоит из весов, секундомера, трубчатого U-образного манометра и электронного датчика температуры.

Погрешность измерения массы воды $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ кг, погрешность секундомера ± 1 с, погрешность измерения перепада давления ± 5 Па, а погрешность измерения температуры рабочей среды оценивалась в $\pm 0,5$ °С.

3. Методика обработки результатов эксперимента

Экспериментально доказано, что величина путевых потерь зависит от следующих факторов:

- диаметра трубы D и ее длины L ;
- физических свойств жидкости (плотности ρ_L и динамической вязкости μ);
- средней скорости движения жидкости в трубе W .

Традиционной для определения путевых потерь в круглых трубах является формула Дарси [5]:

$$\Delta P_{exp} = \xi \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho_L Q_{exp}^2}{2F^2}, \quad (1)$$

где ξ - коэффициент путевых потерь давления;

ΔP_{exp} - измеренное падение давления в профиле, Па;

Q_{exp} - объемный расход, м³/с;

ρ_L - плотность жидкого аммиака, кг/м³;

L - длина исследуемого участка испарителя, м;

$F = 113,329$ мм² - площадь поперечного сечения;

$D_h = \frac{4F}{\Pi_w} = 2,67$ мм - гидравлический диаметр;

$\Pi_w = 169,783$ мм - смоченный периметр.

Экспериментальное значение коэффициента путевых потерь давления определим по формуле

$$\xi = \frac{\Delta P_{exp}}{\frac{\rho_L G_{exp}^2}{2\rho_L^2 F^2} \cdot \frac{L}{D_h}} \quad (2)$$

Величина коэффициента путевых потерь ξ зависит от режима течения, т.е. является функцией числа Рейнольдса, которое равно:

$$Re_h = \frac{\rho_L W D_h}{\mu_L} = \frac{\rho_L Q_{exp} D_h}{F \cdot \mu_L}, \quad (3)$$

где W - скорость жидкого аммиака, м/с;

μ_L - динамическая вязкость жидкого аммиака при нормальных температуре, Па·с.

4. Сравнение результатов экспериментов с известными зависимостями

Потери давления на трение в оребренном внутри канале не подчиняются классическим формулам, представленным в литературе. Сложная форма поперечного сечения испарителя не позволяет применить зависимости вычисления коэффициента гидравлического сопротивления для круглых каналов. На графике рис. 4 можно отметить явные расхождения экспериментальных значений со значениями коэффициента путевых потерь как для ламинарного, так и для турбулентного режимов круглых каналов.

Зависимость коэффициента путевых потерь от числа Рейнольдса для круглых каналов при $Re > 3000$ (турбулентный режим) имеет вид [3]:

$$\xi = \frac{0,316}{Re^{0,25}}; \quad (4)$$

Для $Re < 25002800$ (ламинарный режим)

$$\xi = \frac{64}{Re}. \quad (5)$$

5. Корреляционный анализ и оценка погрешности эксперимента

Была высказана теория о том, что потери давления на трение в оребренном внутри профиле зависит от температуры.

Открытым вопросом в процессе обработки результатов эксперимента являлась зависимость коэффициента путевых потерь в профиле с высоким коэффициентом оребрения от температуры. Необходимо установить зависимость изменения физических свойств теплоносителя на перепад давления [7]. Установлен слабый коэффициент корреляции между числом Прандтля и коэффициентом путевых потерь ($k = -0,37$).

В общем случае величина коэффициента корреляции k может меняться от 0 до ± 1 . Естественно, что чем ближе величина коэффициента корреляции к 1, тем связь между величинами сильнее; чем ближе к 0, тем связь слабее. Неоднозначность качества коэффициента корреляции в данном случае можно объяснить влиянием параметров, зависящих от температуры, на

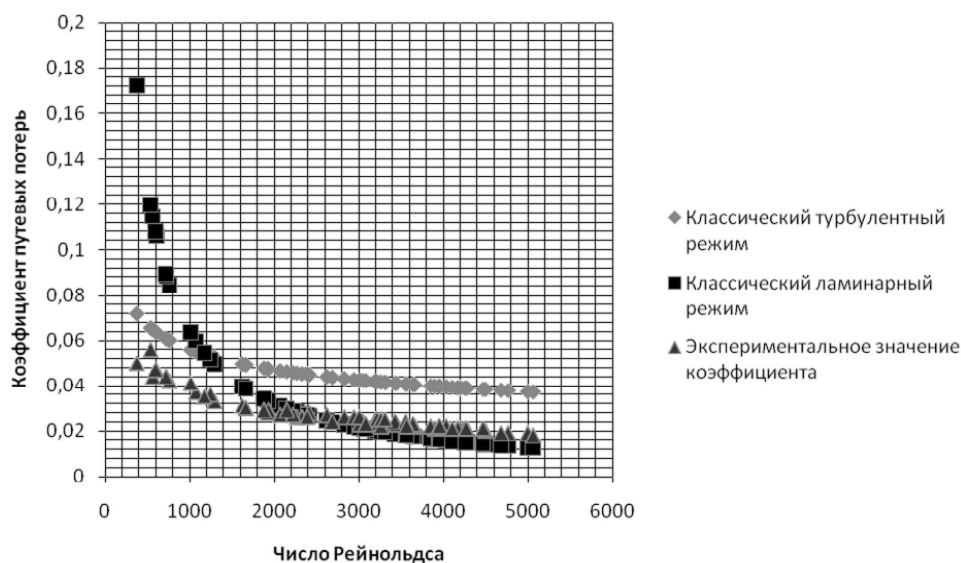


Рис. 4. Сравнения традиционных зависимостей и результатов экспериментов

число Рейнольдса, т.е. вязкости и плотности, что, в свою очередь, влияет на коэффициент путевых потерь.

Погрешность эксперимента зависит от погрешности измерения G_{exp} и ΔP_{exp} и определяется по формуле:

$$\delta\xi = \left[\left(\frac{\partial\xi}{\partial(\Delta P_{\text{exp}})} \cdot \delta(\Delta P_{\text{exp}}) \right)^2 + \left(\frac{\partial\xi}{\partial(\Delta G_{\text{exp}})} \cdot \delta(\Delta G_{\text{exp}}) \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (6)$$

где $\delta(\Delta P_{\text{exp}}) = 5$ Па – погрешность измерения перепада давления на профиле;

$\delta(\Delta G_{\text{exp}}) = 1$ г/с – погрешность измерения массового расхода.

Средняя погрешность эксперимента составила 7,3%. Оценка погрешности коэффициента гидравлических потерь в зависимости от числа Рейнольдса представлена на рис. 5.

Как следует из рис. 4-5, результаты расчетов по эмпирическим зависимостям существенно отличаются от результатов экспериментов. Невязки не могут быть объяснены погрешностями измерения. Необходимо провести аппроксимацию полученных результатов новой

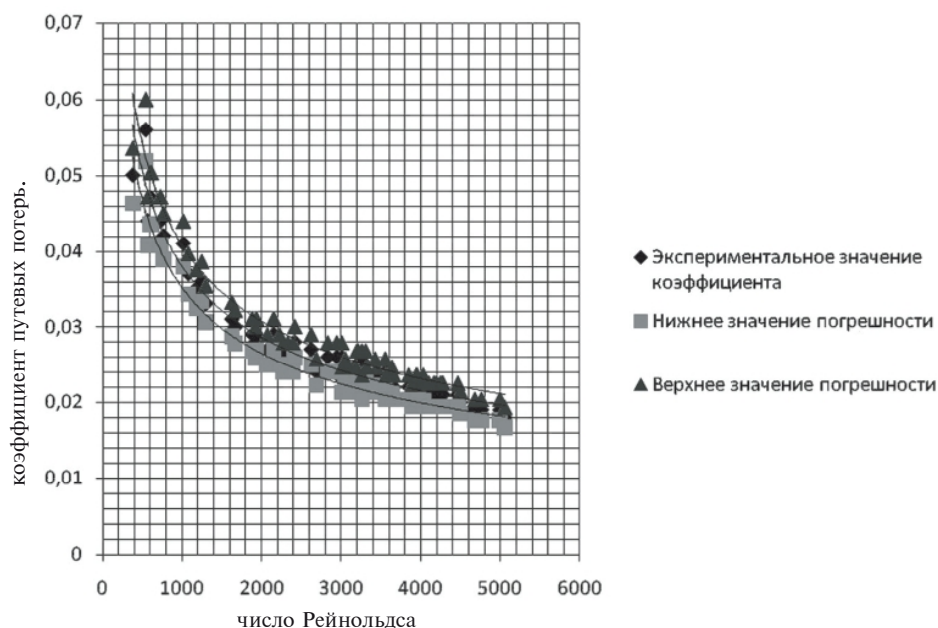


Рис. 5. Экспериментальная погрешность определения коэффициента путевых потерь

зависимостью. За основу новой зависимости возьмем формулу (4) как наиболее близко описывающую результаты экспериментов.

6. Аппроксимация результатов эксперимента

Так как коэффициент сопротивления трения является функцией числа Рейнольдса и слабо зависит от температуры, аппроксимируем результаты экспериментов зависимостью вида:

$$\xi = n \cdot \text{Re}^{-m} \quad (7)$$

При режиме течения жидкости в диапазоне $\text{Re}=400\dots 5000$ все опытные точки можно описать степенной зависимостью вида (7), где

$n=0,63$ и $m=0,4$. Результаты аппроксимации представлены на рис.6.

Заключение

Для данного испарителя в диапазоне чисел Рейнольдса от 400 до 5000 для нахождения коэффициента путевых потерь рекомендовано пользоваться следующей зависимостью

$$\xi = 0,63 \cdot \text{Re}^{-0,4}. \quad (8)$$

Данное заключение справедливо только для течения несжимаемой жидкости в трубе постоянного проходного сечения.

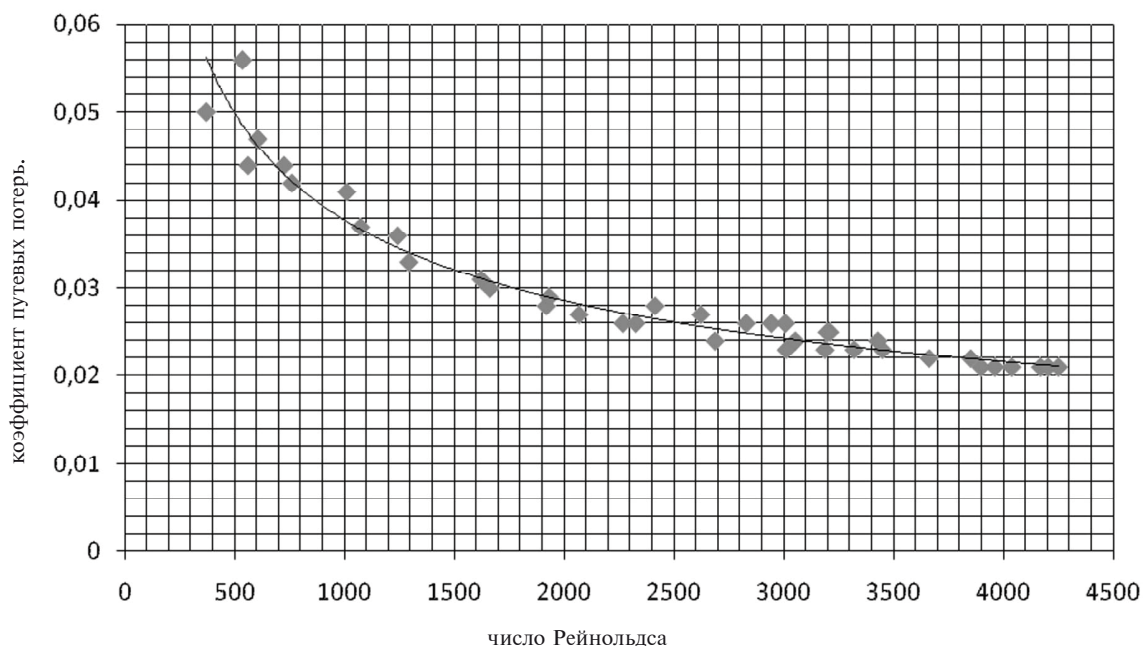


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных данных

Литература

1. Никонов А.А. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов [Текст] / Никонов А.А., Горбенко Г.А., Блинков В.Н. — М: Машиностроение, 1991. — 302 с.
2. Семенов Ю.П. Новые российские технологии в ракетно-космической технике последних лет [Текст] // Вестник российской академии наук — 2000, — Т. 70, №8 — С. 85 — 92.
3. Исаченко В. П. Теплопередача. Учебник для вузов [Текст]/ Исаченко В. П., Осипова В.А., Сукомел А.С. 3-е изд. - М. «Энергия».1975. — 488 с.

4. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / Киселев П.Г., Альтшуль А.Д., Данильченко Н.В. — 4-е изд. - М. «Энергия».1972. — 312 с.

5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] — М.: Машиностроение — 1992. — 672с.

6. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам [Текст] / Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С. , Бобков В.П. — М. Энергоатомиздат, 1990. — 360 с.

7. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Новик Ф.С., Арсов Я.Б. — М. Машиностроение 1980. — 296 с.

Поступила в редакцию 01.07.14

I.П. Квас, К.С. Епифанов. Втрати тиску на тертя в випаровувачі двофазного контуру теплопереносу системи терморегулювання космічних апаратів

Визначені в результаті експериментів гідравлічні опіри випаровувачів системи терморегулювання істотно відрізняються від визначених за класичними залежностями. Було вирішено модифікувати залежності, включивши в них новий параметр, що відображає залежність теплофізичних параметрів середовища від температури. Однак кореляційний аналіз показав слабкий зв'язок між коефіцієнтом гідравлічного опору і числом Прандля. В результаті рішення було знайдено у вигляді залежності від числа Рейнольда. Хоча отримана в результаті залежність задовільно описує отримані дані, фактор, що викликав відхилення залежності від класичних апроксимацій, так і не був виявлений.

Ключові слова: гідравлічний опір, випаровувач, система терморегулювання, космічний апарат.

I.P. Kvas, K.S. Yepifanov. Friction pressure in evaporator of the spacecraft thermoregulation system two-phase heat loop

Defined as a result of experiments hydraulic resistance evaporators thermal control system differ substantially from the classic certain dependencies. It was decided to modify according to include a new parameter reflecting the dependence of the thermal parameters of the medium temperature. However, correlation analysis showed a weak relationship between the coefficient of hydraulic resistance and the Prandtl number. As a result, decision was found as a function of Reynolds number. Although the resulting dependence satisfactorily describes the data, the factor that caused the deviation depending on the classical approximation, and has not been found.

Keywords: hydraulic resistance, evaporator, thermal control system, the spacecraft.